

単層 1 軸偏心建物の非線形応答評価法に関する研究

A Simplified Nonlinear Analysis Procedure for Single-Story Asymmetric Buildings Subjected to Strong Ground Motion

藤井賢志*・中埜良昭*・真田靖士*

Kenji FUJII, Yoshiaki NAKANO and Yasushi SANADA

1. はじめに

想定した地震動に対する建物の非線形応答の評価は、近年に開発された性能評価型の建物の耐震設計法や既存建物の耐震診断手法の重要な項目である。この方法として、建物が強震時に代表的なモードで振動していると仮定して等価な 1 自由度系に置換して非線形応答を評価する方法が示されている^{1,2)}。この方法を偏心建物に適用する場合、偏心建物の場合には常にその応答が一つの振動モードで代表されるとは限らないためにこの方法が適用できない場合がある可能性がある。しかしながら、この応答評価法の適用範囲が明快な形では示されていない。本報告では、単層 1 軸偏心建物を対象として等価 1 自由度系による応答評価法を示し、その適用性に関して検討を行った結果を示す。

2. 等価 1 自由度系による応答評価法

2.1 等価 1 自由度系による応答評価法の流れ

本研究で採用した等価 1 自由度系による応答評価法の流れを以下に示す。

STEP 1 立体建物のモデルによる静的漸増解析を行い、1 層せん断力—最上階変位（本研究では単層 1 軸偏心建物が対象のため 1 階変位である）の関係を求める。

STEP 2 STEP 1 の静的漸増解析の結果を用いて等価 1 自由度系の等価復元力—等価変位の関係を作成する。

STEP 3 等価 1 自由度系の最大応答変位を非線形時刻歴応答解析により求める。

STEP 4 等価 1 自由度系の最大応答変位に対応する最上階変位を目標変位として再び静的漸増解析を行い、各構面および各部材の変形を求める。

なお、STEP 3 に関しては、弾性応答スペクトル等を用いた等価線形化手法等を用いれば簡略化することができるが、本研究では議論の対象外とする。

*東京大学生産技術研究所 人間・社会部門

2.2 単層 1 軸偏心系の等価 1 自由度系への縮約

単層 1 軸偏心系の運動方程式は (式 1) で与えられる。

$$[M]\ddot{d} + [C]\dot{d} + \{R\} = -[M]\{a\} \cdot a_g \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで、

$[M] = \begin{bmatrix} m & 0 \\ 0 & I \end{bmatrix}$: 質量マトリクス, $[C]$: 減衰マトリクス

$\{d\} = \{y \ \theta\}^T$: 重心における変位ベクトル

$\{R\} = \{V_y \ T_z\}^T$: 復元力ベクトル

(せん断力とねじりモーメント)

$\{\alpha\} = \{1 \ 0\}^T$: 加震方向ベクトル

m : 質量 I : 回転慣性質量 a_g : 地動加速度である。

ここで、系の振動が線形・非線形を問わず 1 次モードにより支配されると仮定し、変位ベクトル $\{d\}$ を (式 2) で表すものとする。

$$\{d\} = \beta_1 \{\phi_1\} \cdot D_1^* \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 D_1^* : 等価変位

β_1 : 1 次刺激係数, $\{\phi_1\}$: 1 次モードベクトル

(式 2) を (式 1) に代入し、さらに両辺の左側に $\beta_1 \{\phi_1\}^T$ をかけて整理すると (式 3) を得る。

$$\ddot{D}_1^* + \frac{C_1^*}{M_1^*} \dot{D}_1^* + \frac{R_1^*}{M_1^*} = -a_g \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここで、

$$M_1^* = \beta_1^2 (\{\phi_1\}^T [M] \{\phi_1\}) = \beta_1 \{\phi_1\}^T [M] \{\alpha\} \quad \dots\dots\dots (4)$$

: 1 次等価質量

$C_1^* = \beta_1^2 (\{\phi_1\}^T [C] \{\phi_1\})$: 1 次等価減衰係数

$R_1^* = \beta_1 \{\phi_1\}^T \{R\}$: 1 次等価復元力

(式 3) が等価 1 自由度系の運動方程式である。

3. 解析諸元

3.1 解析モデル

解析建物モデルは、図1に示されている単層1軸偏心建物である。Model-1 (Model-2) はX方向4m×6スパン、Y方向8m×1スパンの長方形平面を持つ建物モデルである。Model-3 (Model-4) はX方向8m×2スパン、Y方向4m×4スパンの正方形平面を持つ建物モデルである。床

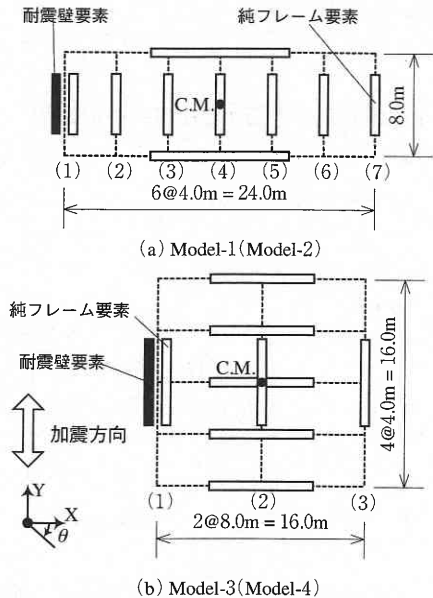


図1 解析建物モデル

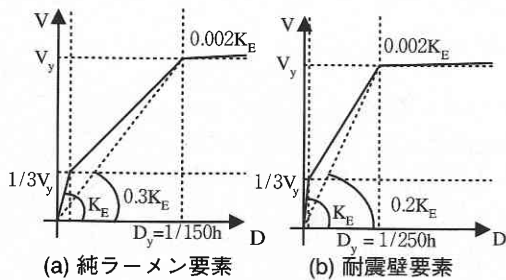


図2 各要素の復元力特性

表1 各要素の耐力

	構面	各要素耐力		構面耐力
		純ラーメン	耐震壁	
Model-1	(1)	0.050W	0.150W	0.200W
Model-2	(2)-(7)		0	0.050W
Model-3	(1)	0.117W	0.150W	0.267W
Model-4	(2)-(3)		0	0.117W

の単位面積あたり質量を 1.2 ton/m^2 、階高を 3.75 m と仮定した。地震動はY方向からの1方向入力とし、建物全体の耐力は、加震方向であるY方向は $0.5W$ (W :建物重量)、直交方向であるX方向は弾性とした。Y方向各構面は、構面(1)では図2(a)に示す純ラーメン要素と図2(b)に示す耐震壁要素がそれぞれ配置され、構面(1)以外の構面では純ラーメンが配置されているものと仮定した。全てのモデルにおいて、純ラーメン要素の耐力は全体で $0.35W$ 、耐震壁要素の耐力は $0.15W$ である。それぞれの建物モデルにおける各構面の耐力を表1に示す。各要素の復元力特性はTakedaモデル³⁾とした。X方向構面の剛性は各構面とも等しいものとし、建物全体のX方向の剛性が建物全体のY方向の弾性剛性と等しいものとした。

偏心建物のモード形の違いによる影響を見るため、上記のモデル(Model-1, 3)に加えて、解析モデル上建物質量 m および構面配置は変更せずに回転慣性 I を4倍にしたモデル(Model-2, 4)を設定した。各モデルの弾性モード形を図3に示す。弾性1次モード形は、Model-1, 3では並進振動が卓越するモード(以下並進卓越型と略記)、Model-2, 4では回転振動が卓越するモード(以下回転卓越型と略記)である。減衰は、各モデルとも瞬間剛性比例型とし、減衰定数は1次モードに対して3%と仮定した。

単層1軸偏心系の応答が等価1自由度系の応答によって推定できるためには、当該単層1軸偏心系の応答において線形・非線形を問わず1次モードが支配的であるという前提条件がある。そこで、(式4)の1次等価質量 M_1^* に着目し、偏心比 $E (= e/i, e$:剛性偏心距離, i :回転半径) を縦軸にとり弾力半径比 $J (= j/i, j$:重心まわりの弾力半径) を横軸にとって1次等価質量の建物質量に占める割合 M_1^*/m の比のコンターラインを描き、各モデルの M_1^*/m を示したのが図4である。図4より、弾性1次モードが並進卓越型であるModel-1, 3では M_1^*/m が大きく、逆に弾性1次モードが回転卓越型であるModel-2, 4では M_1^*/m が小さくなっていることがわかる。

表2 入力地震波の大きさ

地震波	最大加速度 (m/s^2)	倍率	
		Level 1 (1/150)	Level 2 (1/75)
El Centro 1940NS	3.417	0.860	1.300
Taft 1952NS	1.572	1.760	2.940
Hachinohe 1968E W	1.829	1.170	1.610
Tohoku Univ. 1978NS	2.582	0.838	1.322
JMA Kobe 1995NS	8.178	0.298	0.433

	1次モード	2次モード
Model-1		
	$T_1 = 0.269s$	$T_2 = 0.124s$
Model-2		
	$T_1 = 0.368s$	$T_2 = 0.182s$
Model-3		
	$T_1 = 0.245s$	$T_2 = 0.134s$
Model-4		
	$T_1 = 0.346s$	$T_2 = 0.190s$

図3 各モデルの弾性モード形

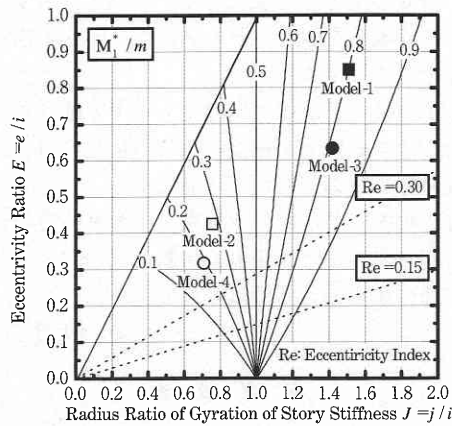


図4 単層1軸偏心系の1次等価質量

3.2 入力地震動

入力地震動は、El Centro 1940 NS, Taft 1952 NS, Hachinohe 1968 EW, Tohoku Univ. 1978 NS, JMA Kobe 1995 NS の5波とし、継続時間は25秒間とした。地震波の大きさは、無偏心のモデルで減衰を3%の瞬間剛性比例型と仮定して応答解析を行ったときの最大変位が階高の1/150と1/75になるように2段階の大きさを設定した。各地震波の原記録の最大加速度、ならびに倍率を表2に示

す。数値積分方法はNewmark- β 法 ($\beta = 1/4$) を用い、積分時間刻みは0.005秒とした。

4. 等価1自由度系による応答評価

4.1 等価1自由度系による応答評価の妥当性の検証

単層1軸偏心系の等価1自由度系による応答評価の前段階として、2.2節に示した等価1自由度系の応答解析を行って単層1軸偏心系の応答と比較し、等価1自由度系への縮約による応答評価の妥当性を検証する。ここでは、等価1自由度系の応答解析に際して振動モード形の変動を考慮し、各ステップにおける1次モード $\beta_1 \{ \phi_1 \}$ を当該ステップにおける各要素の割線剛性を用いて固有値解析により定め、1次等価減衰係数 C_1^* および1次等価質量 M_1^* を順次定めて応答計算を行った。

図5に単層1軸偏心系と等価1自由度系の重心での並進変位の最大応答を示す。図5より、 M_1^*/m の大きいModel-1, Model-3のグループでは単層1軸偏心系と等価1自由度系の重心での並進変位の最大応答は良く対応している一方、 M_1^*/m の小さいModel-2, Model-4のグループでは応答の対応が悪く、等価1自由度系の応答は単層1軸偏心系

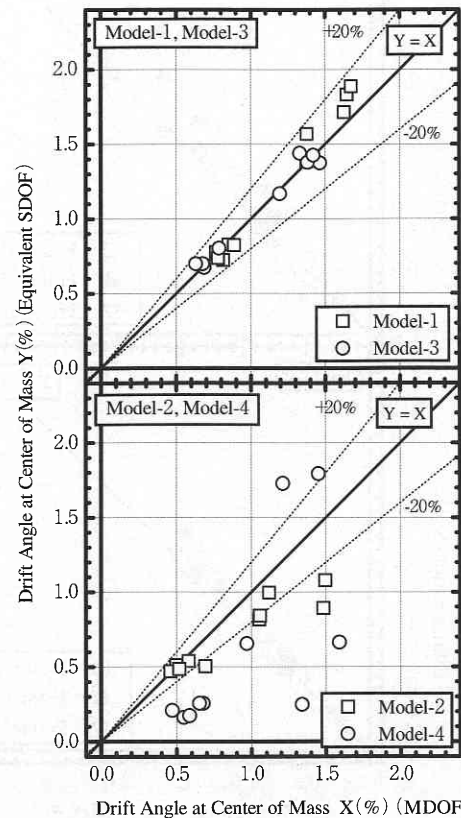


図5 等価1自由度系による応答評価の妥当性の検証

研 究 速 報
 の応答を過小評価していることがわかる。これは、 M_1^*/m の小さい Model-2, Model-4 のグループでは 2 次モード応答の影響が大きいためである。従って、1 次モードが並進型で M_1^*/m が大きい単層 1 軸偏心系の場合には、等価 1 自由度系による応答評価が可能であると考えられる一方、1 次モードが回転型で M_1^*/m が小さい単層 1 軸偏心系の場合には、等価 1 自由度系による応答評価が困難であると考えられる。

4.2 簡略化した等価 1 自由度系による応答評価

前節の検討により、弾性 1 次等価質量が大きい単層 1 軸偏心系の場合には、その応答は等価 1 自由度系の応答と良好な対応を示すことがわかった。そこで、1 次等価質量が大きい Model-1, Model-3 を対象に 2.1 節で示した流れに従い簡略化した等価 1 自由度系による応答評価を試みた。

まず STEP 1 として立体建物モデルを用いて静的漸増解析を行う。静的漸増解析は文献 4) に示されている塑性化の進展に伴う 1 次モード形の変化を考慮した方法によった。次に STEP 2 として、STEP 1 で得られた結果より等価

1 自由度系を作成した。等価 1 自由度系の等価変位—等価加速度 (等価復元力/等価質量) の関係は以下に示す方法により 3 折れ線に置換した。1) 第 1 剛性は弾性時の値とする。2) 第 3 剛性は第 1 剛性の 0.002 倍とする。3) 第 1 折れ点での等価加速度の値は第 2 折れ点での等価加速度の 1/3 倍とする。4) 重心位置での並進変位が階高の 1/75 になるときの点で元の曲線による等価加速度および履歴吸収面積が 3 折れ線と等価になるとし、第 2 折れ点での等価加速度を未知数として方程式を立てる。5) 4) で立てた方程式を解き、第 1 折れ点および第 2 折れ点を決定する。次に STEP 3 で等価 1 自由度系の時刻歴応答解析を行い等価 1 自由度系の最大応答変位を求める。最後に STEP 4 で等価 1 自由度系の最大応答変位に対応する重心位置での並進変位の値を目標変位として再度静的漸増解析を行い、得られた各構面の最大変位を推定値とする。

以上の方法により推定した各構面最大変位と単層 1 軸偏心系の時刻歴応答解析による各構面最大変位の対応関係を図 6 に示す。図 6 より、両者は概ね良く対応していることがわかる。従って、Model-1, 3 のように M_1^*/m が大きい単層 1 軸偏心建物の場合には、等価 1 自由度系による応答の推定が可能である。

5. ま と め

単層 1 軸偏心建物を対象として、等価 1 自由度系による非線形応答評価法を示し、その適用性に関する検討を行った。結論を以下に示す。

- ① 弾性 1 次モードが並進卓越型で 1 次等価質量の占める割合が大きい単層 1 軸偏心建物の場合には、等価 1 自由度系による応答評価が可能である。
- ② 弾性 1 次モードが回転卓越型で 1 次等価質量の占める割合が小さい単層 1 軸偏心建物の場合には、等価 1 自由度系による応答評価は困難である。

(2001 年 9 月 4 日受理)

参 考 文 献

- 1) NHERP Guideline for the Seismic Rehabilitation of Buildings (FEMA 273), Federal Emergency Management Agency, Oct. 1997.
- 2) Seismic evaluation and retrofit of concrete buildings, ATC-40, Report No. SSC 96-01, Applied Technology Council, Nov. 1996.
- 3) Reinforced Concrete Response to Simulated Earthquakes, T. Takeda, M. A. Sozen, N. N. Nielsen, Journal of ASCE, pp. 2557-2573, Dec. 1970.
- 4) 単層偏心建物の Pushover 解析, 藤井賢志, 中埜良昭, 日本建築学会大会学術講演集 (関東), CD-ROM, 2001 年 9 月.

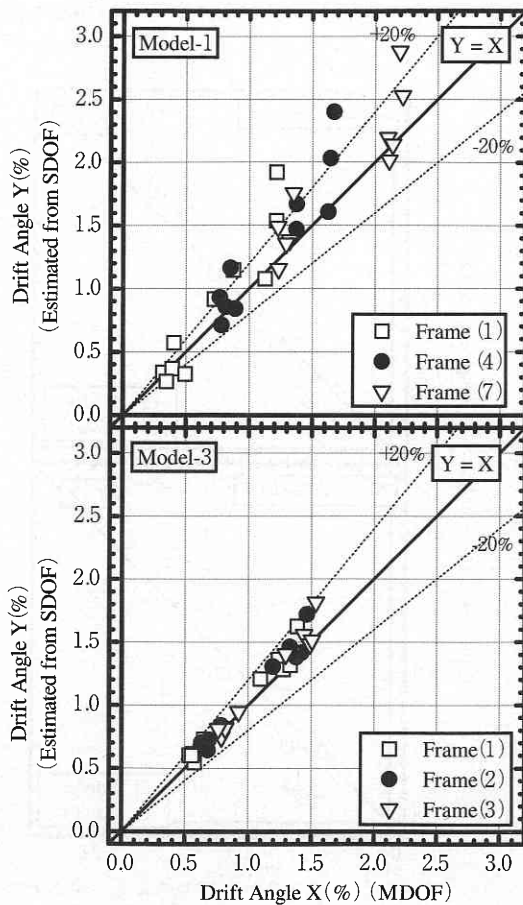


図 6 簡略化した等価 1 自由度系による応答評価